

# Optimización Múltiple de Variables en un Proceso de Fabricación de Adhesivos de Poliuretano.

<sup>1</sup>Cabrera-Castro J.J., <sup>1</sup>Villalobos-González L.F.\*, Bravo Carlos A.

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Metal-Mecánica.

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Aguascalientes, Ags.

\*COLPII: Colegio de Profesionistas en Ingeniería Industrial de León, Guanajuato. A.C.

lfvillalobosg@hotmail.com

*Recibido:* 20 de septiembre de 2020

*Aprobado:* 20 de noviembre de 2020

## RESUMEN

Se llevó a cabo un estudio de optimización simultánea de múltiple respuesta empleando la función de deseabilidad para resolver el problema de optimización múltiple que presenta un proceso de fabricación de adhesivos base poliuretano. Se utilizó un diseño central compuesto con un arreglo factorial  $2^3$ . Fueron estudiadas las superficies de respuesta de las variables de salida: viscosidad (cP), cantidad de solvente recuperado (%), y tiempo de procesamiento, en un segundo paso (min). Se agregaron dos bloques para estudiar su efecto en las respuestas. Fueron analizadas las ecuaciones de regresión empleando el ANOVA. Los porcentajes de  $R^2$  mostraron un ajuste mayor al 70% en las tres variables de respuesta. En este análisis se demostró que el tiempo de proceso disminuye, cuando se trabaja en nivel bajo la válvula de agua de enfriamiento del reactor, y trabajando en nivel bajo la hora del día; se obtiene una viscosidad dentro de las especificaciones para los productos sin afectar la calidad del producto, asimismo el tiempo de procesamiento para la fabricación de los adhesivos se ve sensiblemente reducida. Se encontró también que el tipo de materia prima de poliuretano utilizada afecta el tiempo de procesamiento. Finalmente, se logró obtener la función global que optimiza las condiciones de operación del proceso.

**Palabras claves:** Poliuretano, optimización múltiple, función de deseabilidad.

## ABSTRACT

A multiple response simultaneous optimization study was carried out using the desirability function to solve the multiple optimization problem presented by a polyurethane-based adhesive manufacturing process. A central composite design with a  $2^3$  factorial arrangement was used. The response surfaces of the output variables were studied: viscosity (Cp), amount of solvent recovered (%), and processing time, in a second step (min). Two blocks were added to study their effect on the responses. Regression equations were analyzed using ANOVA. The  $R^2$  rates showed an adjustment greater than 70% in the three response variables. In this analysis it was shown that the process time decreases, when the reactor cooling water valve is operated at a low level, and when the time of day is working at a low level; A viscosity is obtained within the specifications for the products without affecting the quality of the product, also the processing time for the manufacture of the adhesives is significantly reduced. It was also found that the type of polyurethane raw material used affects the processing time. Finally, it was possible to obtain the global function that optimizes the operating conditions of the process.

**Keywords:** Polyurethane, multiple optimization, desirability function.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los adhesivos o pegamentos son ampliamente utilizados en muchos sectores industriales, donde es esencial su uso diario para la fabricación de miles de productos. Existen muchas clases de formulaciones y metodologías capaces de realizar la vinculación o unión de varios sustratos. Dentro de los más populares en México, existen los elaborados con base polimérica de poliuretano.

El procesamiento de adhesivos de poliuretano, por lo regular es realizado en reactores tipo o Batch, en este tipo de proceso, donde no entra ni sale material, la transformación se realiza, una vez cargados todos los componentes: dióxido de silicio, resina copolímero de cloruro de vinilo y acetato de vinilo, sistema de Titanato, zirconato y aluminato, poliuretano termoplástico, sistema de solventes (tolueno, acetona), de acuerdo con la cantidad de formulación (Kinloch, A., 1987).

Una vez cargados los aditivos dentro del reactor se ejecuta el mezclado, cuidando las condiciones de operación como: el tiempo de mezclado y temperatura. Después de un determinado lapso, se toma una muestra de dicho Batch para verificar si la mezcla cumple con las especificaciones es liberado de acuerdo a los resultados de viscosidad (cP) y porcentaje de sólidos de adhesivo (Martín-Martínez, J.J. 2003; , Stapleton, S. et al, 2017).

Por lo que, en la actualidad para desarrollar adhesivos, se pueden considerar el empleo de la Metodología de Superficie de Respuestas (MRS), en el cual se busca tener mayor certeza sobre las cantidades óptimas de las mezclas de formulación.

Entre los trabajos que utilizan la MSR para desarrollar adhesivos se encuentra el realizado por Ortiz-Fernández, et al (2020) en el cual examinan la mejor respuesta obtenida de adhesión entre dos fibras naturales (yuca y sago), en el arreglo experimental se variaron las cantidades de los aditivos y las cantidades de las fibras, con el tiempo de curado de las mezclas. A partir del arreglo experimental lograron determinar las cantidades óptimas de las fibras que permitieran cumplir las condiciones de resistencia al despegado de 115 N/m a 125 N/m.

Otro trabajo relacionado, es el estudio experimental de Wang, Y. et al (2018) quienes utilizan la MSR para preparar adhesivos base agua preparados a partir de harina de soja, en donde obtuvieron las condiciones de procesamiento y la cantidad óptima de harina de soja que permitan reducir la respuesta de la resistencia al desgarro en húmedo. Los resultados permitieron detectar efectos significativos de las tres variables estudiadas, la cual fue cantidad de poliuretano base agua. Este trabajo no hace uso de la optimización simultánea, dado que tiene como fin desarrollar un producto de adhesivo, solo se enfocan a realizar trabajo de corte exploratorio para identificar que niveles de operación son los que deben seleccionar, encontrando eficacia en la aplicación de la MSR para tal propósito.

Sin embargo, la metodología de superficie de respuesta es un diseño robusto que se ocupa básicamente, con la optimización de una sola respuesta o característica de calidad que es a menudo la más crítica para los consumidores, para la mayoría de los productos, sin embargo, en algunas ocasiones la calidad tiene varias características que se deben de cumplir es multidimensional, por lo que es común observar respuestas múltiples en una situación experimental.

En la práctica industrial de la fabricación de adhesivos, es de interés el equilibrio de las condiciones de operación, y la optimización simultánea de varias respuestas empleando la MSR es un

planteamiento adecuado para reducir costos de operación y mantener las características de calidad del producto terminado, cuando estas características son más de una variable,

Debido a estas situaciones de encontrar varias respuestas o características críticas, la aplicación de la metodología de superficie de respuesta puede llevar a cabo una optimización múltiple a través de la utilización de una función de utilidad como lo es la función de deseabilidad que nos permite realizar la optimización múltiple de varias variables a la vez. como el trabajo presentado por Morales-Torres, et al. (2020) quienes mediante la optimización simultanea logra equilibrar las condiciones de operación de un proceso de mezclado de caucho.

Dichas funciones de utilidad combinan todas las variables de respuesta en un solo valor cuantitativo, también llamado métrica de desempeño, es decir, las funciones de utilidad son transformaciones del conjunto de variables de respuesta. La optimización de la función de utilidad en función de los factores de control conduce, a las condiciones de proceso óptimas donde se encuentra la combinación de valores de los factores estudiados, en la cual se considera toda la región de operabilidad.

Dentro de los primeros antecedentes del empleo de la función de deseabilidad o utilidad para optimizar varias respuestas, se encuentra el trabajo realizado por Harrington, (1965) quién mediante un esquema de optimización utilizando, al que denomina “la función de deseabilidad”, para el problema de optimización múltiple de la calidad global del producto entre varias propiedades de calidad individuales. Harrington, propone una escala de deseabilidad individual que oscila entre 0 y 1, un  $d_i = 0$  corresponde a un nivel totalmente indeseable de la calidad, por lo tanto, el producto no es aceptable. Por otra parte, un  $d_i = 1$  representan un nivel completamente aceptable de calidad y la deseabilidad general (D) la obtiene mediante la media.

Posteriormente, Derringer & Suich, (1980), emplean una diferente forma la función de deseabilidad e ilustran su uso en un ejemplo en el desarrollo de un compuesto de goma para bandas de rodadura de neumáticos. Para maximizar esta función geométrica de las deseabilidades individuales.

El fundamento de la función de deseabilidad, transforma cada respuesta a un valor correspondiente a la deseabilidad entre 0 y 1. Toda la deseabilidad se puede combinar para formar un compuesto de deseabilidades individuales, para que la función convierta un problema múltirespuesta, en una sola respuesta.

La función de deseabilidad es una escala (índice invariante), que permite que las características de calidad puedan llevarse a cabo mediante la comparación con varias unidades. Es un método en el que se puede fácilmente determinar los parámetros óptimos entre un grupo de soluciones. Mientras tanto, cuando una respuesta cae dentro del intervalo de tolerancia, pero no el intervalo ideal, y/o cuando no puede alcanzar su valor ideal, la deseabilidad se encuentra entre 0 y 1.

Cuanto más estrechamente la respuesta se aproxima a los intervalos ideales o valores ideales, es cuanto más cerca de esta la deseabilidad a 1. Esto para es para cada variable de respuesta, ya que busca el óptimo simultáneo, encontrando una solución compromiso basada en la función de deseabilidad global, que satisfaga una solución donde todas las variables tengan un nivel satisfactorio. (Del Castillo, et al., 1996).

En su caso, Del Castillo, et al., (1996) utilizaron la MSR aplicando la función deseabilidad para optimizar varias respuestas, modificando las funciones de deseabilidad, basados en el método de

gradiente de optimización, en un proceso industrial de la unión por hilo que se produce en la fabricación de semiconductores.

Por su parte Arain, et al., (2012). Utilizaron la metodología de superficie de respuesta con optimización múltiple, Para determinar la mejor velocidad del rotor y el nivel de torsión del hilo, para la fuerza óptima hilo en Hilados de algodón, mediante la deseabilidad propuesta por Derringer y Suich.

Sin embargo, el trabajo realizado por Morales-Torres et al (2020), es de los pocos planteamiento que optimizan varias variables de salida, ya que los productos terminados que de obtienen en los procesos industriales debe cumplir no solo una característica de calidad. El estudio se realizó en un proceso productivo, y se lograron resultados óptimos para las todas las variables, tanto de operación como las variables de salida a partir de encontrar una función de deseabilidad entre todas las variables

Por lo que los procesos de fabricación de adhesivos deben cumplir diversas condiciones de calidad en los adhesivos a producir, en función de ello, se opta por utilizar la metodología de superficie de respuesta y la utilización de la una función de utilidad como lo es la función de deseabilidad para realizar la optimización de variables múltiples para reducir los costos de operación en el proceso de fabricación de los adhesivos sin afectar el rendimiento final del producto terminado.

El presente trabajo consistió en realizar la optimización de las variables de proceso en el reactor tipo Batch, para reducir los tiempos de procesamiento en una la línea de fabricación de adhesivos de base poliuretano, aplicando el diseño de experimentos mediante la metodología de superficie de respuesta, con optimización múltiple. Con base en este fundamento y aplicación de la metodología que busca el óptimo simultaneo, encontrando una solución compromiso basada en la función de deseabilidad. Esta herramienta que permite el mejoramiento y robustez de procesos, con el objetivo de que los bienes producidos se adecuen de la mejor manera posible a las exigencias del mercado.

## **2. METODOLOGIA**

Para realizar la optimización de las variables de procesos, se utiliza un diseño central compuesto con 23 con puntos axiales y puntos al centro, que permite analizar los datos recolectados mediante los métodos estadísticos, resultando en conclusiones objetivas y válidas. (Montgomery, 2008).

La metodología propuesta (Figura 3.1), consiste en dos etapas, la primera es realizar un estudio de capacidad del proceso, seguidamente de la determinación de las variables controlables y las variables de respuesta para la aplicación de la metodología de superficie de respuesta para optimizar cada variable de respuesta y verificar los supuestos, realizar la validación de la probabilidad normal de los tratamiento, si no se cumplen realizar las transformaciones para estabilizar la varianza y minimizar el problema por falta de normalidad y de varianza heterogénea.

Seguidamente de obtener la respuesta de cada efecto y observar si hay diferencia significativa. continuar con la investigación llevando a cabo la réplica del diseño y realizar la optimización simultanea de respuesta múltiple mediante la función de utilidad, aplicando la función de deseabilidad para realizar la optimización del proceso, después la segunda etapa es hacer nuevamente un estudio de capacidad, ya con la optimización del proceso y después comparar el resultado de las capacidades antes y después de la optimización, para denotar la mejora en el proceso y la reducción de los tiempos de proceso en segundo paso o denominado por la empresa como “reproceso”.

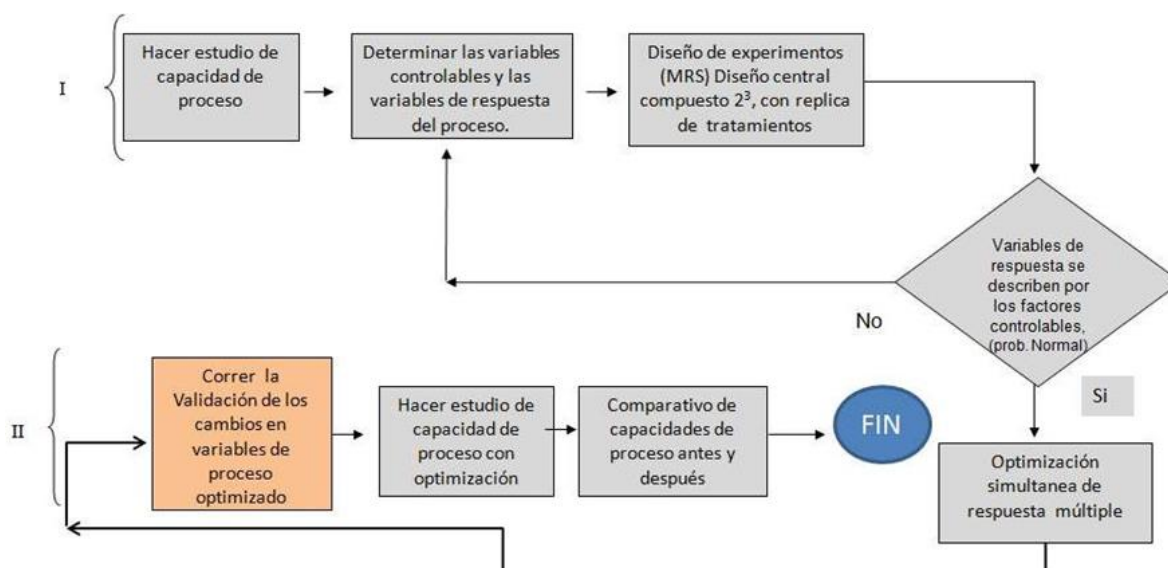


Figura 3.1.- Esquema de la metodología

## 2.1 DETERMINACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA Y VARIABLES SALIDA O DE RESPUESTA.

En el proceso de manufactura de adhesivos existen muchas variables de las cuales, por políticas de la empresa no pueden ser modificadas o reveladas, como las formulaciones de los productos. Lo que limita el estudio a variables de proceso, de las cuales se detectaron solo 3 factores controlables las cuales son:

- Apertura de válvula de enfriamiento al reactor. ( % apertura de la válvula)
- El tiempo de integración (tiempo de mezclado).
- La hora del día como variable categórica. (la radiación solar presenta variación con la hora del día.)
- Las variables de respuesta para este diseño se consideran las siguientes:
- Solvente recuperado (kg)
- Viscosidad (cps “Centipoises”)
- Tiempo de reproceso (minutos)

Por el número reducido de factores no se realiza cribado de los factores controlables. Con esta definición de variables de proceso para la manufactura de adhesivos de poliuretano se procede a la elaboración del diseño central compuesto 2<sup>3</sup> para la realización de la experimentación de este proyecto.

Para la creación del diseño experimental es utilizado el diseño central compuesto 2<sup>3</sup>. Este diseño, mediante la metodología de superficie de respuesta permite encontrar el óptimo para cada variable de respuesta y con optimización múltiple obtenida mediante la función de utilidad, obtener el óptimo simultaneo, encontrando una solución compromiso basada en la función de deseabilidad para el conjunto de variables involucradas dentro del diseño, por lo cual se definen las siguientes variables de proceso para la creación del diseño experimental antes mencionado.

Se ajustaron, de tal manera para el diseño controlando tres factores “X”: la válvula de agua de enfriamiento (X1), el tiempo de integración (X2,) y la hora del día (X3), como variable categórica y optimizando tres variables de respuesta “Y”: la viscosidad (Y1), el tiempo de reproceso (Y2) y solvente recuperado (Y3), los experimentos se realizaron utilizando, el mismo reactor de acero inoxidable, el mismo operador y como factor de bloque: la materia prima para cada replica, quedando el diseño experimental para este proyecto.

Se determina el diseño central compuesto para las variables establecidas tomando como consideración los casos de estudio (Derringer & Suich, 1980), (Del Castillo, et al., 1996), (Hendriks, et al., 1992.), Para la creación del diseño experimental y la aplicación de la función de deseabilidad. Se realiza la determinación de los niveles a manejar para este diseño quedando de la manera en que se muestra en la tabla 2.1.

Para la planeación de este experimento se considero la materia prima como restricción que hace considerar el factor de bloque en el estudio considerando dos tipos de proveedores de poliuretanos Merquinsa y Huntsman respectivamente.

El objetivo del experimento repartido en bloques es estudiar los efectos de los k factores sobre las respuestas y conocer la pertinencia de haberlo considerado. El uso adecuado de bloques incrementa la precisión del experimento, además es un medio para darle un rango de validez mayor al estudio (Ver tabla 2.2).

**Tabla 2.1 Variables sin codificar para el diseño experimental.**

NIVELES CODIFICADOS	NIVELES SIN CODIFICAR		
	APERTURA DE VÁLVULA EFRIAMIENTO (X1) %	TIEMPO DE INTEGRACIÓN (X2) (Min.)	HORA DEL DÍA (X3) (Hrs.)
+	80	150	18
0	50	120	13
-	20	90	9

## 2.2 MATERIALES Y MÉTODOS.

La elaboración se lleva a cabo dentro de un reactor tipo Batch en acero al carbón con un volumen de 1836 l. De capacidad, donde no entra ni sale material una vez colocados dentro del reactor y son mezclado todos los componentes, en otras palabras, al inicio del proceso se introduce los materiales: dióxido de silicón, resina vinílica, sistema de óxidos metálicos, (Titanato, zirconato y aluminato), poliuretano termoplástico (proveedores: Huntsman Y Merquinsa), sistema de solventes (tolueno, acetona), de acuerdo a la cantidad de formulación (confidencial), y se deja mezclar por un tiempo preestablecido, una vez pasado el tiempo de reacción, se toma una muestra de la mezcla para determinar sus especificaciones de acuerdo a la norma ASTM D2556-93A y es liberado por viscosidad (cps) y % de sólidos del adhesivo.

Cabe mencionar que la recolección de los datos de las variables de salida se llevó a cabo mediante los siguientes equipos que se describen a continuación junto con sus características para cada una de las variables: Viscosidad, solvente recuperado y tiempo de procesamiento en segundo paso o “tiempo de reproceso”

Para la variable de viscosidad se tomó una muestra representativa del proceso, y mediante el viscosímetro BROOK-RVDV-II, se obtuvo el resultado de manera automática ya que es un equipo muy preciso y con un rango de acuerdo a las necesidades del proceso. En cuanto a la variable de

solvente recuperado se tomó la cantidad total que se recupera del condensador del reactor y mediante un recipiente de acero inoxidable y pesando la cantidad mediante una báscula marca esnova modelo 40x0510, con un rango capacidad de 40 kg X 5 O 10 g.

Para la variable del tiempo de procesamiento en segundo paso o “tiempo de reproceso” se tomaron los minutos de dicho tiempo mediante un reloj-cronómetro de la marca Casio digital stopwacht HS 10.

Mediante todas estas herramientas y equipo a través de esta metodología se pretende obtener las mejoras sustanciales en la disponibilidad de los equipos y la reducción de tiempos de reproceso así como los costos de producción, como el cumplimiento del programa de producción semanal, para obtener los tiempos óptimos de integración, y tener mejores tiempos de respuesta y eficiencia.

**Tabla 2.2. Diseño de experimentos utilizado bajo el tipo central compuesto 2<sup>3</sup>**

BLOQUE MATERIA PRIMA	APERTURA DE LA VÁLVULA (X1)	TIEMPO DE INTEGRACIÓN (X2)	HORA DEL DÍA (X3)	VISCOSIDAD (Y1)	SOLVENTE RECUPERADO (Y2)	TIEMPO DE REPROCESO (Y3)
	VARIABLES CODIFICADAS			VARIABLES DE RESPUESTA		
MERCQUINSA	1.668	0	0	4600	0.089	160
	1	-1	-1	3560	0.09	120
	0	1.666667	0	3640	0.088	230
	0	0	1.666666	3120	0.071	120
	-1	1	-1	3180	0.064	150
	-1.666667	0	0	3250	0.03	120
	0	0	-1.222222	3120	0.056	120
	-1	-1	1	3450	0.054	120
	-1	1	1	3100	0.043	150
	1	1	1	4250	0.08	200
	0	-1.666667	0	3380	0.065	120
	1	1	1	3370	0.061	150
	-1	-1	-1	3200	0.058	120
	1	1	-1	3840	0.085	120
	0	0	0	3380	0.05	120
	0	0	0	3380	0.061	120
	0	0	0	3650	0.059	150
	0	0	0	3370	0.058	120
H D	1.668	0	0	3880	0.079	150
	1	-1	-1	3470	0.089	120
	0	1.666667	0	3160	0.092	200
	0	0	1.666666	3140	0.0824	120
	-1	1	-1	3420	0.072	180
	-1.666667	0	0	2980	0.042	120
	0	0	-1.222222	3360	0.061	150
	-1	-1	1	3080	0.049	120
	-1	1	1	3160	0.053	150
	1	1	1	3560	0.0867	180
	0	-1.666667	0	3210	0.073	120
	1	1	1	3410	0.069	150

2	-1	-1	-1	3240	0.0625	120
2	1	-1	1	3960	0.091	120
2	0	0	0	3100	0.07	120
2	0	0	0	3110	0.065	120
2	0	0	0	3070	0.0621	150
2	0	0	0	3140	0.0629	120

### 3. RESULTADOS.

Tras la ejecución de los tratamientos arrojados por el diseño experimental se obtuvieron las respuestas mostradas en la tabla 3.1 para la presente investigación experimental.

**Tabla 3.1. Resultados obtenidos en los tratamientos obtenidos en los experimentos.**

Filas	Solvente recuperado	Tiempo de reproceso	Viscosidad
1	0.089	160.0	4600.0
2	0.09	120.0	3560.0
3	0.088	230.0	3640.0
4	0.071	120.0	3120.0
5	0.064	150.0	3180.0
6	0.03	120.0	3250.0
7	0.056	120.0	3120.0
8	0.054	120.0	3450.0
9	0.043	150.0	3100.0
10	0.08	200.0	4250.0
11	0.065	120.0	3380.0
12	0.061	150.0	3370.0
13	0.058	120.0	3200.0
14	0.085	120.0	3840.0
15	0.05	120.0	3380.0
16	0.061	120.0	3380.0
17	0.059	150.0	3650.0
18	0.058	120.0	3370.0
19	0.079	150.0	3880.0
20	0.089	120.0	3470.0
21	0.092	200.0	3160.0
22	0.0824	120.0	3140.0
23	0.072	180.0	3420.0
24	0.042	120.0	2980.0
25	0.061	150.0	3360.0
26	0.049	120.0	3080.0
27	0.053	150.0	3160.0
28	0.0867	180.0	3560.0
29	0.073	120.0	3210.0
30	0.069	150.0	3410.0
31	0.0625	120.0	3240.0
32	0.091	120.0	3960.0
33	0.07	120.0	3100.0
34	0.065	120.0	3110.0
35	0.0621	150.0	3070.0
36	0.0629	120.0	3140.0



### 3.1 BÚSQUEDA INICIAL DEL MODELO DE PRIMER ORDEN.

Se aplica la etapa de la búsqueda inicial como lo marca la metodología de superficie de respuesta, ya que se tienen pocos factores ( $k \leq 5$ ), en este caso solo contamos con 3 factores, y se quería conocer si estos factores influyen en la variable de respuesta. En esta etapa se corre un diseño de primer orden que permita caracterizar en forma preliminar el tipo de superficie de respuesta y detectar la presencia de curvatura (Gutierrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008). Se utilizó un diseño 23 replicado y agregando 4 puntos al centro para observar si presentaba curvatura dicho diseño, mostrando los siguientes resultados.

#### 3.1.1 ANÁLISIS DE LA VARIABLE VISCOSIDAD

Evaluando los resultados de la mejor ANOVA en la tabla de la figura 3.1.1, se observa que hay 3 efectos significativos de cada efecto mediante la comparación de la media cuadrática contra una estimación del error experimental, además se puede observar que el bloque es significativo entre la materia prima que se utiliza, por otro lado, los coeficientes de determinación son menores que el 70% por lo que el modelo lineal no describe la variable de respuesta adecuadamente.

La prueba de falta de ajuste está diseñada para determinar si el modelo seleccionado es adecuado para describir los datos observados, o si un modelo más complicado se debe utilizar. La prueba se lleva a cabo mediante la comparación de la variabilidad de los residuales del modelo actual y la variabilidad entre las observaciones repetidas en la configuración de los factores. Dado que el valor-p de la falta de ajuste es menor a 0.05 en la tabla de ANOVA, en el nivel de confianza del 95%, esto significa que el modelo descrito no representa adecuadamente los datos, Por otro lado, la prueba de falta de ajuste indica la existencia de curvatura en la región experimental y se requiere utilizar un modelo más complicado o de segundo orden.

#### 3.1.2 ANÁLISIS DE LA VARIABLE TIEMPO DE REPROCESO.

Evaluando los resultados de la mejor ANOVA en la tabla de la figura 3.1.2, se observa que hay 2 efectos significativos de cada efecto mediante la comparación de la media cuadrática contra una estimación del error experimental. Por otro lado, los coeficientes de determinación, son menores que el 70% por lo que el modelo lineal no describe la variable de respuesta adecuadamente.

**Figura 3.1.1. Análisis de varianza para la variable viscosidad**

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Relación-F	Valor-P
A:APERTURA DE VALVULA	805506.	1	805506.	34.88	0.0000
C:HORA DEL DIA	150156.	1	150156.	6.50	0.0231
AC	262656.	1	262656.	11.37	0.0046
Blocks	168338.	1	168338.	7.29	0.0173
Prueba falta de ajuste	357556.	5	71511.3	3.10	0.0435
Error puro	323350.	14	23096.4		
Total (corr.)	2.06756E6	23			

R-cuadrada = 67.0672 Por ciento  
 R-cuadrada (ajustada para G.L.) = 62.1273 Por ciento  
 Error estándar de Est. = 151.975  
 Media del error absoluto = 152.188  
 Estadístico Durbin-Watson = 1.97298 (P=0.4097)

La prueba de falta de ajuste está diseñada para determinar si el modelo seleccionado es adecuado para describir los datos observados, o si un modelo más complicado se debe utilizar. La prueba se lleva a cabo mediante la comparación de la variabilidad de los residuales del modelo actual y la variabilidad entre las observaciones repetidas en la configuración de los factores. Dado que el valor-p de la falta de ajuste es menor a 0.05 en la tabla de ANOVA, en el nivel de confianza del 95%, esto significa que el modelo descrito no representa adecuadamente los datos, además la prueba de falta de ajuste indica la existencia de curvatura en la región experimental y se requiere utilizar un modelo más complicado o de segundo orden.

**Figura 3.1.2. Análisis de varianza para Tiempo de Reproceso.**

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Relación-F	Valor-P
A: APERTURA DE VALVULA	156.25	1	156.25	1.17	0.2961
B: TIEMPO DE INTEGRACION	7656.25	1	7656.25	57.42	0.0000
C: HORA DEL DIA	156.25	1	156.25	1.17	0.2961
AC	756.25	1	756.25	5.67	0.0309
Prueba de ajuste	2170.83	4	542.708	4.07	0.0198
Error Puro	2000.0	15	133.333		
Total (corr.)	12895.8	23			

R-cuadrada = 67.6575 por ciento  
 R-cuadrada (ajustada para G.L.) = 60.8486 por ciento  
 Error estándar de Est. = 11.547  
 Media del error absoluto = 11.4236  
 Estadístico Durbin-Watson = 2.01511 (P=0.5518)  
 Lag 1 residual autocorrelation = -0.0588578

### 3.1.3 Análisis de la variable solvente recuperado.

efectos significativos de cada efecto mediante la comparación de la media cuadrática contra una estimación del error experimental. Por otro lado, los coeficientes de determinación son iguales al 70% por lo que el modelo lineal trata de describir la variable de respuesta adecuadamente. La prueba se lleva a cabo mediante la comparación de la variabilidad de los residuales del modelo actual y la variabilidad entre las observaciones repetidas en la configuración de los factores.

Dado que el valor-p de la falta de ajuste es menor a 0.05 en la tabla de ANOVA, en el nivel de confianza del 95%, esto significa que el modelo descrito no representa adecuadamente los datos, además la prueba de falta de ajuste indica la existencia de curvatura en la región experimental y se requiere utilizar un modelo más complicado o de segundo orden.

**Figura 3.1.3. Análisis de varianza para la variable solvente recuperado.**

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Relación-F	Valor-P
A: APERTURA DE VALVULA	0.0024059	1	0.0024059	87.30	0.0000
B: TIEMPO DE INTEGRACION	0.000155003	1	0.000155003	5.62	0.0315
C: HORA DEL DIA	0.0000354025	1	0.0000354025	1.28	0.2748
AB	0.00027889	1	0.00027889	10.12	0.0062
AC	0.00051984	1	0.00051984	18.86	0.0006
Prueba falta de ajuste	0.000618906	3	0.000206302	7.49	0.0027
Error puro	0.00041339	15	0.0000275593		
Total (corr.)	0.00442733	23			

R-cuadrada = 76.6836 por ciento  
 R-cuadrada (ajustada para g.l.) = 70.2068 por ciento  
 Error estándar de Est. = 0.0052497  
 Media del error absoluto = 0.00551111  
 Estadístico Durbin-Watson = 1.16173 (P=0.0283)  
 Lag 1 residual autocorrelation = 0.38044

### 3.2 BÚSQUEDA DEL MODELO DE SEGUNDO ORDEN.

En el momento en que se detecta la presencia de curvatura, o bien, que la superficie es más complicada que un hiperplano, se corre o se completa un diseño de segundo orden para caracterizar mejor la superficie y modelar la curvatura. Con el modelo ajustado se determinan las condiciones óptimas de operación del proceso (Gutierrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008). Para cada una de las variables de respuesta, se corrió un diseño central compuesto replicado 23, con 4 puntos centrales para ganar grados de libertad y 4 puntos axiales. Las variables de respuesta estudiadas son: la viscosidad, el solvente recuperado y el tiempo de reproceso.

La ANOVA divide la variación de la respuesta, la cual se obtiene para cada efecto. En esta prueba se mide la significación estadística para cada efecto, comparando la suma de cuadrados medios del error contra un estimado del error experimental. Los efectos con un valor-p menor que 0.05 son significativamente mayores que cero. El estadístico  $R^2$  indica el porcentaje de la variación de la respuesta que se explica con el modelo ajustado. El  $R^2_{ADJ}$  es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes. El error estándar de estimación es la desviación estándar de los residuales.

Mientras que la media del error absoluto es el promedio de los residuales. El estadístico Durbin-Watson prueba los residuales para determinar si existe alguna correlación significativa en el orden en el que se realizaron las corridas. Un valor p menor que 0.05 indica la correlación en la secuencia de las corridas.

Cada función se analiza por separado, en dicho análisis se muestran la ANOVA con mayor  $R^2_{ADJ}$ , el gráfico de residuales Vs predichos y de probabilidad normal para los residuales, los estadísticos para los modelos de regresión y los coeficientes del modelo.

La optimización múltiple se realiza, después de analizar cada una de los efectos y ver el comportamiento de cada factor, mediante la optimización múltiple se encontrará la solución compromiso mediante la función de deseabilidad y obtener los niveles más convenientes para trabajar los efectos para la reducción de los reprocesos en la manufactura de adhesivos de la línea de los poliuretanos

#### 3.2.1 ANÁLISIS DE LA VARIABLE VISCOSIDAD

Evaluando los resultados de la mejor ANOVA se obtiene que, para la variable de viscosidad se observan 4 efectos significativos como lo muestra la tabla de la figura 3.2.1.1, se demostró que, para dicha variable, se sugiere trabajar la válvula de agua de enfriamiento del reactor en nivel bajo, así mismo que si se trabaja la hora del día en el nivel bajo se puede obtener la viscosidad dentro de especificaciones como lo muestra el gráfico de superficie ([gráfico 16](#)).

Además de que el bloqueo de la materia prima es significativo, lo cual afecta dependiendo el tipo de proveedor de los PU'S (poliuretanos) que se utiliza si es factor para la presencia de dichos retrabajos en la manufactura de adhesivos de la línea de poliuretanos

**Figura 3.2.1.1 . Tabla ANOVA para la variable viscosidad**

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Relación-F	Valor-p
A:APERTURA DE VALVULA	1.98611E6	1	1.98611E6	55.57	0.0000
C:HORA DEL DIA	75226.0	1	75226.0	2.10	0.1576
AA	576249.	1	576249.	16.12	0.0004
AC	262656.	1	262656.	7.35	0.0112
CC	45743.1	1	45743.1	1.28	0.2672
Blocks	319225.	1	319225.	8.93	0.0057
Total error	1.03655E6	29	35743.2		
Total (corr.)	4.31516E6	35			

R-cuadrada = 75.9788 por ciento

R-cuadrada (ajustada para g.l.) = 71.9753 por ciento error estándar del Est. = 189.059

Media del error absoluto = 143.219

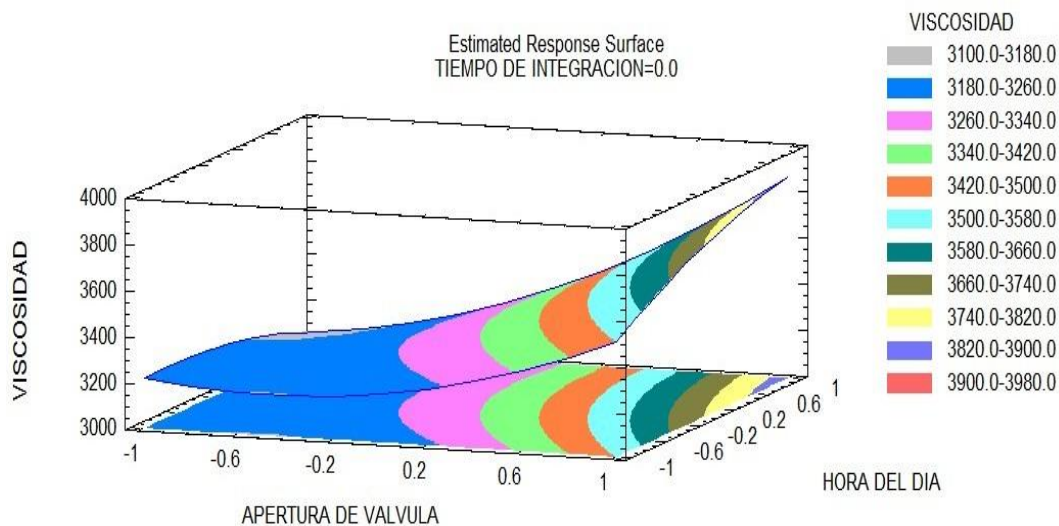
Estadístico Durbin-Watson = 2.17652 (P=0.6149) Auto correlación del residual Lag 1 = -0.1421

El modelo de regresión obtenido para la variable de salida, viscosidad sería el siguiente:

$$\text{VISCOSIDAD} = 3318.14 + 270.618 \cdot \text{APERTURA DE VALVULA} + 56.9236 \cdot \text{HORA DEL DIA} + 148.418 \cdot \text{APERTURA DE VALVULA}^2 + 128.125 \cdot \text{APERTURA DE VALVULA} \cdot \text{HORA DEL DIA} - 50.5048 \cdot \text{HORA DEL DIA}^2$$

Mediante el modelo de regresión las superficies de respuesta para la variable serían la que se muestra en la figura 3.2.2

**Figura 3.2.1.2 Superficie de respuesta para la variable viscosidad**



### 3.2.2 ANÁLISIS DE LA VARIABLE TIEMPO DE REPROCESO

Evaluando los resultados de la mejor ANOVA se obtiene que, para la variable tiempo de reproceso se observan 4 efectos significativos como lo muestra la tabla 3.2.2.1

**Figura 3.2.2.1. Tabla ANOVA para la variable tiempo de reproceso.**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Relación-F	Valor-P
A:APERTURA DE VALVULA	1025.09	1	1025.09	5.73	0.0231
B:TIEMPO DE INTEGRACION	16393.4	1	16393.4	91.67	0.0000
C:HORA DEL DIA	0.989713	1	0.989713	0.01	0.9412
AC	756.25	1	756.25	4.23	0.0485
BB	4648.91	1	4648.91	26.00	0.0000
Total error	5364.89	30	178.83		
Total (corr.)	28188.9	35			

R-cuadrado = 80.9681 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 77.7961 por ciento Error estándar del Est. = 13.3727

Media del error absoluto = 10.3414

Estadístico Durbin-Watson =2.08957 (P=0.6154)

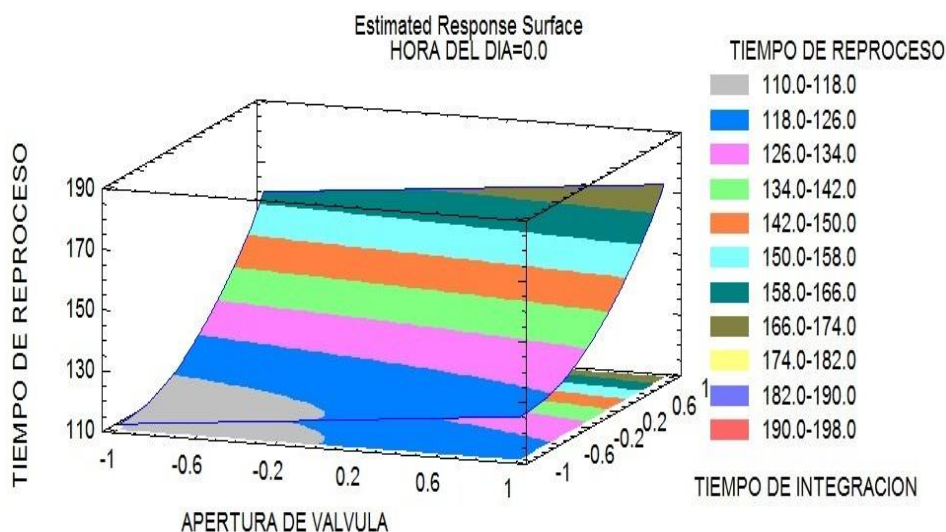
Auto correlación del residual Lag = -0.0914928

El modelo de regresión obtenido para la variable de salida, tiempo de reproceso sería el siguiente:

$$\text{TIEMPO DE REPROCESO} = 129.451 + 6.14803 \cdot \text{APERTURA DE VALVULA} + 24.5902 \cdot \text{TIEMPO DE INTEGRACION} + 0.200971 \cdot \text{HORA DEL DIA} + 6.875 \cdot \text{APERTURA DE VALVULA} \cdot \text{HORA DEL DIA} + 13.2628 \cdot \text{TIEMPO DE INTEGRACION}^2$$

Mediante el modelo de regresión las superficies de respuesta para la variable serían la que se muestra en la figura 3.2.2.2

**Figura 3.2.2.2 Superficie de respuesta para la variable viscosidad**



### 3.2.3 ANÁLISIS DE LA VARIABLE SOLVENTE RECUPERADO

Evaluando los resultados de la mejor ANOVA se obtiene que, para la variable de solvente recuperado se observan 6 efectos significativos como lo muestra la tabla 18, lo anterior sugiere que si se trabaja en nivel bajo la válvula de agua de enfriamiento del reactor y en nivel bajo el tiempo de integración se logra recuperar parte del solvente, como lo muestra el grafico de superficie 3.2.3.2. Además de que el bloqueo de la materia prima es significativo, lo cual afecta dependiendo el tipo de proveedor de los poliuretanos que se utiliza.

**Figura 3.2.3.1 Tabla ANOVA para la variable solvente recuperado**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Relación-F	Valor-P
A:APERTURA DE VALVULA	0.0046801	1	0.0046801	84.95	0.0000
B:TIEMPO DE INTEGRACION	0.0000150507	1	0.0000150507	0.27	0.6055
C:HORA DEL DIA	0.00000918078	1	0.00000918078	0.17	0.6863
AB	0.00027889	1	0.00027889	5.06	0.0328
AC	0.00051984	1	0.00051984	9.44	0.0048
BB	0.00114062	1	0.00114062	20.70	0.0001
CC	0.000233005	1	0.000233005	4.23	0.0495
Blocks	0.00027556	1	0.00027556	5.00	0.0338
Total error	0.0014875	27	0.0000550924		
Total (corr.)	0.00856858	35			

R-cuadrada = 82.6401 por ciento

R-cuadrada (ajustada para g.l.) = 78.3001 por ciento

Error estándar de Est. = 0.00742243

Media del error absoluto = 0.00540359

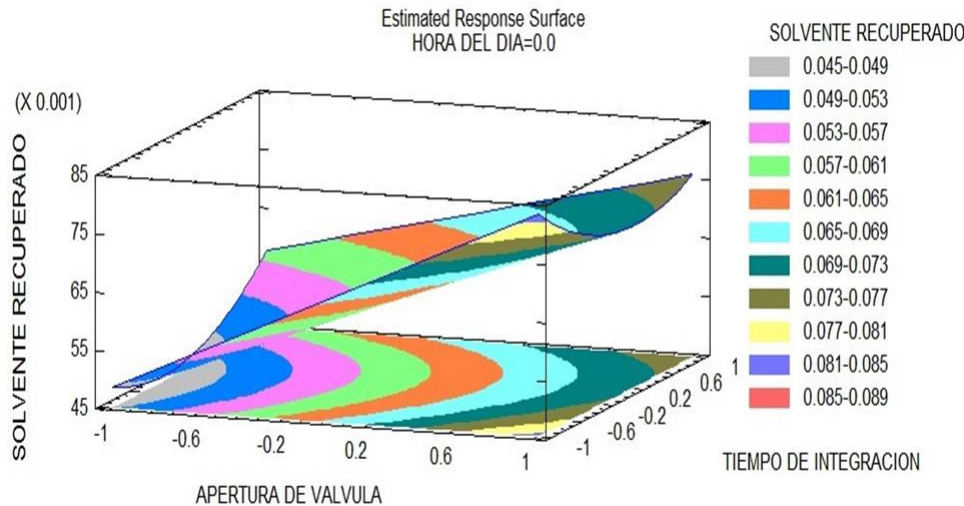
Estadístico Durbin-Watson = 1.34091 (P=0.0154)

Auto correlación residual Lag 1 = 0.296024

El modelo de regresión obtenido para la variable de salida, recuperación de solvente sería el siguiente:

$$\text{SOLVENTE RECUPERADO} = 0.0598723 + 0.0131366 \cdot \text{APERTURA DE VALVULA} + 0.000745082 \cdot \text{TIEMPO DE INTEGRACION} + 0.000628852 \cdot \text{HORA DEL DIA} - 0.004175 \cdot \text{APERTURA DE VALVULA} \cdot \text{TIEMPO DE INTEGRACION} + 0.0057 \cdot \text{APERTURA DE VALVULA} \cdot \text{HORA DEL DIA} + 0.00660754 \cdot \text{TIEMPO DE INTEGRACION}^2 + 0.00360449 \cdot \text{HORA DEL DIA}^2$$

**Figura 3.2.3.2 Superficie de respuesta para la variable viscosidad**



**3.2.4 ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN OBTENIDOS.**

. Para considerar simultáneamente varias respuestas, implica la construcción de modelos de regresión adecuados (errores independientes, distribuidos normalmente con media cero y varianza constante  $R^2_{aj} \geq 70\%$ ). La función de deseabilidad es una escala de índice de varianza, que permite a las características de calidad que se comparan, con las distintas unidades.

Por lo que hacer una revisión de los parámetros de ajuste de los modelos obtenidos nos permite tener un parámetro relacionado con la variación explicada por los datos experimentales. En la tabla 3.2.4 se observa el resumen de los parámetros más importantes.

En la tabla 3.2.4, se observa que los valores de  $R^2$  y  $R^2_{ADJ}$ , contiene valores superiores al 70% con ello podemos asegurar que los tres modelos cuentan con el ajuste de variación adecuado para realizar un estudio de análisis de optimización simultánea. Por su parte los valores de error estándar de la estimación y media del error absoluto no ofrecen valor demasiado elevados.

En cuanto, a los valores del estadístico Durbin Watson examina los residuos para determinar si existe alguna correlación significativa basada en el orden en que aparecen en el archivo de datos. Puesto que el valor P es mayor que 5.0%, no hay ninguna indicación de auto correlación serial en los residuos en el nivel de significancia del 5.0%. Por lo tanto, el único valor que cumple con el supuesto de no autocorrelación entre los datos, sería la variable solvente recuperado.

**Tabla 3.2.4. Resumen de los parámetros de ajuste de los modelos de regresión obtenidos para las tres variables**

ESTADISTICO	VISCOSIDAD	SOLVENTE RECUPERADO	TIEMPO DE REPROCESO
$R^2$	75.9788	82.6401	80.9681
$R^2_{Aj}$	71.9753	78.3001	77.7961
ERROR ESTANDAR DE LA ESTIMACION	189.059	0.00742243	13.3727
MEDIA DEL ERROR ABSOLUTO	143.219	0.00540359	10.3414
	2.17652	1.34091	2.08957
DURBIN WATSON	(P=0.6149)	(P=0.0154)	(P=0.6154)

### 3.2.5 OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTAS MÚLTIPLES.

Debido a que es improbable que el óptimo global coincida con el óptimo de alguna respuesta individual, la solución del problema de respuesta múltiple suele ser satisfactoria para cada respuesta individual; puede esperarse que exista un punto de operación del proceso en el que todas las variables de respuesta cumplen con los requerimientos de la mejor manera posible.

La función de deseabilidad es una escala de índice de varianza, que permite a las características de calidad que se comparan, con las distintas unidades. Por lo tanto, la función de deseabilidad es un medio eficaz para optimizar los valores que se requieran, (Raissi & Farsani Eslami, 2009).

La función de deseabilidad involucra la transformación del estimador  $y^t$  en un valor deseado,  $d_{ij}$  donde,  $0 \leq d_{ij} \leq 1$ , después, las deseabilidades individuales se combinan mediante la media geométrica (Myers & Montgomery, 2009), el enfoque de la función de deseabilidad es uno de los más frecuentemente utilizados, para la optimización de respuestas múltiples en la práctica. La deseabilidad se encuentra entre 0 y 1 y representa la cercanía de una respuesta a su valor ideal, por este motivo se aplicó esta herramienta para la optimización de las variables respuestas múltiples en la manufactura de adhesivos de la línea PU.

Para empezar a realizar la optimización simultánea, se realizaron los cálculos de la deseabilidad de acuerdo con los objetivos de optimización, como lo muestra la tabla 3.2.5.1, Mediante este procedimiento nos permite determinar la combinación de factores experimentales y que al mismo tiempo optimizar varias respuestas. Mediante la maximización de una función de deseabilidad evaluados en cada punto en el diseño.

Con base a la declaración anterior se pretende recuperar el máximo del solvente en cada carga en el reactor, además que la viscosidad quede dentro de la especificación en su valor nominal, y que el tiempo de reproceso sea mínimo para elaborar el producto.

**Tabla 3.2.5.1 Valores observados mínimos y máximos para variables de respuesta**

VARIABLES DE RESPUESTA	Valor observado mínimo	Valor observado máximo
Solvente recuperado	0.03	0.092
Tiempo de reproceso	120	230
Viscosidad	2980	4600

Entre los puntos de diseño, se consigue la máxima deseabilidad en la ejecución 29, y en la cual se obtiene una deseabilidad predicha de 0.88253, la mayor entre todas las ejecuciones como lo muestra la tabla 3.2.5.1. Por otro lado, también se observa que en el tratamiento 22 de dicha tabla se observa una deseabilidad predicha de 0.84932, la cual se adecua a los parámetros de trabajo más adecuados para el proceso.

**Tabla 3.2.5.2 Deseabilidad de acuerdo con los objetivos de optimización**

VARIABLES DE RESPUESTA	Deseabilidad (bajo)	Deseabilidad (alto)	Meta	Pesos Primero	Pesos Segundo	Impacto
Solvente recuperado	0.03	0.092	Max.	1.0	-	3.0
Tiempo de reproceso	120	230	Min.	1.0	-	3.0
Viscosidad	2900	3980	3140	1.0	1.0	3.0

Encontrando la combinación entre las variables y las condiciones de operación, se observa los niveles en los cuales, cada uno de los factores se logra la deseabilidad del óptimo global, y como se deben trabajar los niveles de las variables en su conjunto para obtener la optimización. Deseabilidad optimizada Valor Óptimo = 0.923009

La tabla 3.2.5.2, nos indica las condiciones de operación en los niveles en los cuales se deben trabajar las variables controlables, para la optimización del proceso, como la válvula de enfriamiento es recomendable en nivel bajo, el valor óptimo para esta variable es -0.300604, lo que se traduce en variables decodificadas que la apertura de la válvula del agua de enfriamiento del reactor permanezca al 0% de apertura o completamente cerrada, el tiempo de integración en un punto estrella bajo con valor de -1.64856 lo que se traduce en variables decodificadas en tiempo de 70-90 min , y la hora del día en un punto axial alto con valor de 1.66667 lo que se traduce en variables decodificadas las 6:00 hrs del día.

Cabe mencionar que se detecta una buena deseabilidad predicha en el tratamiento 22 con un valor de 0.84932 en condiciones de operación: válvula del agua de enfriamiento del reactor permanezca al 0% de apertura, en nivel central de tiempo de integración de 120 min. A las 13:30 pm de la hora del día, la cual se adecua de una mejor manera a los parámetros de trabajo para la elaboración en la manufactura de los adhesivos de la línea de poliuretanos, esto por necesidades y restricciones de planta y obtener el reducir el tiempo de reproceso y la viscosidad manteniéndose dentro en especificación.

Esta tabla 3.2.5.4, nos muestra los valores que se pueden lograr en las variables de respuesta con dicha optimización, es decir que si trabajamos en los niveles recomendados de acuerdo con el valor máximo la función de deseabilidad sobre la región indicada se logra obtener los valores óptimos de proceso como lo muestra el gráfico de superficie (gráfico 26).



**Tabla 3.2.5.3 Condiciones de operación óptimas para las variables de respuesta**

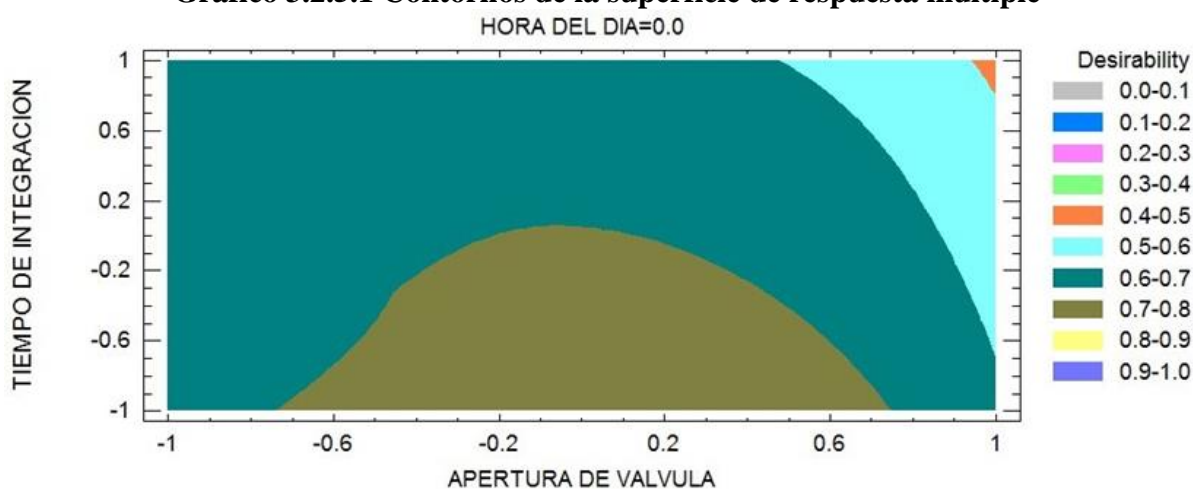
VARIABLES DE RESPUESTA	Bajo	Alto	Óptimo
Solvente recuperado	-1.66667	1.668	-0.300604
Tiempo de reproceso	-1.66667	1.66667	-1.64856
Viscosidad	-1.22222	1.66667	1.66667

**Tabla 3.2.5.4 Valores óptimos de respuesta para las variables de salida**

VARIABLES DE RESPUESTA	Óptimo
Solvente recuperado	0.0787885
Tiempo de reproceso	3140.6
Viscosidad	90

En este análisis se demostró que la eficiencia en el tiempo de integración aumenta cuando se trabaja en nivel bajo la válvula de agua de enfriamiento del reactor, y trabajando en nivel bajo el tiempo de integración disminuye el tiempo de reproceso como lo muestra el gráfico 3.2.5.1, por lo cual la viscosidad se encuentra dentro de la especificación para los productos disminuyendo los desperdicios con los tiempos de ajuste de reproceso para la fabricación de los adhesivos de la línea PU, buscando la región óptima de acuerdo con la función de deseabilidad.es

**Gráfico 3.2.5.1 Contornos de la superficie de respuesta múltiple**



#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

A partir de los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta, la discusión se centra a partir de cada una de las tres variables estudiadas para finalizar con las condiciones de operación obtenidas como óptimas siguiendo la secuencia de la Metodología de Superficie de Respuestas propuesta por Gutiérrez Pulido y De la Vara (2008).

En primer lugar, se tiene para la variable de salida o variable de respuesta identificada como “viscosidad”, y en función de parámetros obtenidos en los análisis de estadístico y la verificaciones de los gráficos, se puede considerar lo siguiente:

- El ANOVA de la figura 3.2.1.1 muestran la existencia de cuatro efectos estadísticamente significativos, los cuales reportan valores de P inferiores al parámetro a 0,05. Esto indica que son significativamente diferentes de cero en el nivel de confianza del 95.0%. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo se ajusta en un 75.9788 % de la variabilidad en los datos experimentales obtenidos con la variable viscosidad. El estadístico del R-cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es, 71.9753 %. El error estándar de la estimación muestra en la desviación estándar de los residuos es 189.059. El error absoluto medio (MAE) es 143.219 el cual, es el valor medio de los residuos. Tales parámetros son pequeños en relación con las respuestas promedio. Teniendo, por tanto, que todos estos parámetros permiten garantizar la significancia estadística del ajuste observado por los datos experimentales.
- En el mismo análisis de varianza se observó que el estadístico Durbin-Watson (DW) muestra que no existe ninguna indicación de auto correlación serial en los residuos en el nivel de significancia del 5.0%, ya que el valor obtenido del valor P mayor que 5.0%.
- En cuanto a la superficie de respuesta observada por la variable viscosidad, la cual fue ilustrada en el gráfico 3.2.1.1 permite sugerir que, sí se trabaja la válvula de agua de enfriamiento del reactor y el tiempo de integración, ambas en los niveles bajos; disminuye la variable el tiempo de reproceso como lo muestra el grafico el grafico 3.2.1.1. Además, el bloqueo del factor “materia prima” se observa con un efecto significativo. Lo cual, significa que dependiendo el tipo de proveedor de los poliuretanos que se utiliza afecta a los “retrabajos” en la fabricación de adhesivos de base poliuretano. Por lo tanto, para observar estas respuestas es conveniente operar la válvula de enfriamiento en nivel bajo. Por su parte el tiempo de integración, se encontró que lo más conveniente es que este sea operado en el nivel bajo, donde se pueda obtener la viscosidad dentro de las especificaciones deseadas.

Por su parte, para la variable de respuesta identificada como “tiempo de reproceso”, los resultados análisis estadísticos y la examinación de los gráficos indican lo siguiente:

- El ANOVA de la figura 3.2.2.1 muestra que para esta variable de respuesta se obtuvieron tres efectos significativos, los cuales mostraron valores de P inferiores a 0.05, lo cual indica que son significativamente diferentes de cero en el nivel de confianza del 95.0%. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo se ajusta en un 80.9681% de la variabilidad para la variable estudiada. En tanto, que el estadístico del R-cuadrado ajustado (que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes) fue de, 77.7961%. El error estándar de la estimación muestra la desviación estándar de los residuos es 13.3727. El error absoluto medio (MAE) es 10.3414 el cual es valor medio de los residuos. Todos estos parámetros mostraron valores dentro de lo recomendada para recomendar que el ajuste observado es estadísticamente significativo.
- El resultado del ANOVA también indicó que el estadístico Durbin-Watson (DW) muestra que no hay ninguna indicación de auto correlación serial en los residuos en el nivel de significancia del 5.0%, ya que el valor obtenido en dicha prueba es mayor que 5.0%,
- La superficie de respuesta arrojada por la variable de salida denominada “tiempo de respuesta” (gráfico 3.2.2.2), nos muestra los niveles en los cuales se debe o es conveniente trabajar el proceso, a bien de reducir la magnitud de esta variable. Por lo que, a partir de lo observado, se sugiere: sí se trabaja la válvula de agua de enfriamiento del reactor y el tiempo de integración en nivel bajo, disminuye el tiempo de reproceso como lo muestra el grafico de superficie obtenido en los datos experimentales estudiados.

Para el caso de la variable de salida denominada como “solvente recuperado”, los resultados obtenidos a través de los gráficos y análisis estadísticos se puede considerar lo siguiente:

- El ANOVA de la figura 3.2.3.1 nos permite observar la presencia de seis efectos significativos, lo cuales fueron detectados a partir de los valores de P inferior a 0.05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero en el nivel de confianza del 95.0%. Y entre las variables estudiadas, el bloqueo resultó ser significativo, lo cual puede ser considerado factor para la cantidad de solvente recuperado. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo se ajusta en un 82.6401% de la variabilidad para la variable de respuesta analizada (solvente recuperado). El estadístico del R-cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 78.3001%. El error estándar de la estimación muestra la desviación estándar de los residuos a ser 0.00764859. El error absoluto medio (MAE) es 0.00531695 es el valor medio de los residuos.
- Asimismo, el análisis de variación observado en la figura 3.2.3.1 indicó que el estadístico Durbin-Watson (DW) no muestra la existencia de auto correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.
- En cuanto a la superficie de respuesta de la variable “solvente recuperado”, el gráfico 3.2.3.2, nos muestra la superficie obtenida, en la cual se observa claramente cuales funciones es conveniente operar el proceso para recuperar solvente. Sugiriendo que, sí se operan en los niveles bajos, tanto la válvula de agua de enfriamiento del reactor, como el tiempo de integración. Entonces se logra recuperar parte del solvente; tal como lo muestra el gráfico de superficie (gráfico 3.2.3.2). Además, el arreglo experimental de bloqueo resultó significativo, lo cual afecta dependiendo el tipo de proveedor de los poliuretanos que sean utilizados.

Finalmente, en la optimización simultanea de las tres variables de salida, se puede considerar para las condiciones detectadas como óptimas lo siguiente:

- En las regiones de respuesta múltiple se obtuvo un punto en la región experimental, en el cual las variables de respuestas presentan las características deseadas. Particularmente, se observó que los resultados son próximos a unos valores específicos y con varianza pequeña.
- Sí consideramos la optimización de todas las variables de respuesta observadas, fue posible encontrar una solución global en el proceso, la cual se encontró al momento de operar con la válvula de agua de enfriamiento del reactor completamente cerrada y el tiempo de integración de 120 minutos y fabricando los productos a las 13:30 pm, logrando que no se incrementan los tiempos de proceso y se eliminan los tiempos de reproceso.
- El tiempo de reproceso disminuye, cuando se trabaja en nivel bajo la válvula de agua de enfriamiento del reactor, y trabajando en nivel bajo la hora del día, se obtiene una viscosidad dentro de las especificaciones para los productos sin afectar la calidad del producto y disminuyendo el tiempo de ajuste de reproceso para la manufactura de los adhesivos de poliuretano.
- Se encontró también que el tipo de materia prima de poliuretano que se utiliza afecta al incremento de los tiempos de reproceso, dependiendo del proveedor que se utilice para dicha fabricación de productos.

## **5. CONCLUSIONES Y/O PROYECTOS FUTUROS.**

La Metodología de Superficie Respuestas (MSR) utilizada en el presente estudio, permitió obtener condiciones óptimas en las tres variables de respuesta analizadas. Lo cual está plenamente verificado al cumplir los objetivos de reducir los tiempos de procesamiento, logrando que la viscosidad se mantuviera dentro de las especificaciones del producto.

El diseño experimental central compuesto, aplicado para el estudio de las tres variables de respuesta, fue adecuado y permitió explorar la región óptima en la búsqueda del modelo de segundo orden.

Con ello los modelos de regresión obtenidos presentaron ajustes deseados para continuar en la búsqueda de la optimización múltiple de las variables que intervienen en la calidad de los adhesivos.

Lo anterior fue de suma relevancia, ya que para la fabricación de cierto tipo de adhesivos siempre se busca hacer un equilibrio entre el binomio calidad y precio competitivo. Ello cobra relevancia sobre todos en los procesos de fabricación por Bach, como es el caso de los adhesivos a base poliuretano. En estos procesos, se corren riesgos de optimizar una sola de las características, pero provocar que las demás propiedades se vean afectadas, con ello que resultado deriven en un producto de mala calidad en general.

Por lo que la estrategia de experimentación facilitó optimizar, de manera simultánea a todas las variables de respuesta de interés en la fabricación de los adhesivos de base poliuretano, y con ello encontrar un punto de operación, donde todas las variables tengan un valor deseado, tal como fue obtenido a partir de la función de deseabilidad.

Las condiciones de optimalidad arrojadas por el presente estudio son condiciones factibles para realizarse en un proceso de fabricación industrial, dado que los puntos de operación arrojados fueron realistas, al encontrarse dentro de las regiones de experimentación observadas en las superficies de respuestas de las tres variables de estudiadas.

Por último, el presente estudio solo permite encontrar las condiciones de operación que permiten alcanzar la optimización simultanea de las variables. Sin embargo, sería importante realizar estudios que permitan validar las condiciones de operación obtenidas, pero ahora en un flujo continuo producción, y con ello asegurar una transferencia a nivel industrial de las condiciones obtenidas.

Dado lo anterior, sería deseable la realización de un estudio para confirmar que las condiciones de operación obtenidas en este análisis puedan ser comprobadas en un proceso continuo de fabricación industrial. Lo cual pudiera ser un proyecto futuro que, de continuidad a la presente investigación, y con ello logran transferir con éxito a otros procesos de Bach semejantes para la fabricación de adhesivos de cualquier otra base polimérica que utilice solvente, p.e. caucho o Policloruro de Vinilo.

## **6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- Arain, F. A., Tanwari, A., Hussain, T., & Malik, Z. A. (2012). Multiple Response Optimization of Rotor Yarn for Strength, Unevenness Hairiness and Imperfections. *Fibers and Polymers* Vol.13, No.1, 118-122
- Box G. E. P. y Draper N. (1987). "Empirical model-building and response surfaces". Wiley, Nueva York.
- Box, G., et., al. (1978) "Estadistics for Experimenters". John Willey & Sons, Nueva York.
- Castaño E. Y Domínguez J. (2003) "Experimentos: Estrategia en ciencia y tecnología". Centro de Investigaciones en Matemáticas, Guanajuato, Gto. México
- Del Castillo, E., Montgomery, D., & McCarville, D. (1996). Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization. *Technology., Journal of Quality*, 225-346.
- Derringer, G., & Suich, R. (1980). "Simultaneous Optimization of Several Response Variables". . *Journal of Quality Technology*, 214-219.
- Gutiérrez H. y de la Vara R. "Análisis y Diseño de Experimentos" 2008, Edit. Mc GrawHill, México, D. F.
- Harrington, E. (1965). The desirability function,. *Industrial Quality Control*, 494–498.
- Kinloch, A. (1987). Adhesión and adhesives: *SCIENCE AND TECHNOLOGY*. En A. Kinloch,

- Adhesión and adhesives: SCIENCE AND TECHNOLOGY (págs. 56-62). Great Britain: KLUWER.
- Lawson J., Madrigal J., Erjavec J. (1992) "Estrategias Experimentales para el Mejoramiento de la Calidad en la industria". Edit. Iberoamericana S.A. de C. V., México D. F.
- Martín-Martínez, J. M. (2003). Handbook of adhesives and sealants. "shoe industry". En J. M. Martín- Martínez, Handbook of adhesives and sealants. (págs. 1315-1350). University of Alicante Spain: Springer.
- Montgomery D. (2001) "Diseño y Análisis de Experimentos". Edit Limusa Wiley, Segunda Edición, México D. F.
- Murria, A., Immelt, J. y Berezowitz, W. (1999) "Six Sigma Method". United Patent and Trade mark office, patente 6'675,135 B1, 2004.
- Myers R. y Montgomery D., "Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiments", 2002, Edit John Wiley & Sons, Inc., Segunda Edición, Nueva York.
- Morales-Torres, Víctor T; Sanchez, Jöns; Alonso, Sergio; Villalobos-Gonzalez, L.F. (2020) Estudio de Optimalidad simultanea de variables en el procesamiento de mezclas de caucho vulcanizado. Revista Electrónica de Divulgación de la Investigación, Revista de la Universidad del SABES. Vol 19, junio 2020. Recuperado de [https://sabes.edu.mx/redi/19/pdfs/2\\_estudio-de-optimalidad-simultanea-de-variables-en-el-procesamiento-de-hule-vulcanizado.pdf](https://sabes.edu.mx/redi/19/pdfs/2_estudio-de-optimalidad-simultanea-de-variables-en-el-procesamiento-de-hule-vulcanizado.pdf)
- Ortiz-Fernández, Alejandro; Ríos Soberanis, Carlos Rolando, Chim-Chi, Yasser Alejandro; Moo-Huchin, Víctor Manuel, Estrada-León, Raciél Javier, Perez-Pacheco, Emiliano (2020). Optimization of biodegradable starch adhesives using response Surface methodology. Polymer Bulletin Springer. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03297-y>
- Stapleton, Scott E. Weimer, Julia; Spengler, Jan (2017) Design of functionally graded joints using a polyurethane-based adhesive with varying amounts of acrylate. International Journal of Adhesion and Adhesives
- Raissi, S., & Farsani Eslami, R. (2009). Statistical Process Optimization Through Multi-Response Surface Methodology. World Academy of Science, Engineering and Technology. 261-271
- Wang, Yong, Deng Layun, Fan Youhua (2018) Preparation of soy-based adhesive enhanced by waterborne polyurethane: Optimization by response surface methodology. Hindawi Advances in materials science and engineering. Vol 2019, ID 9253670. Recuperado de <http://doi.org/10-1155/2018/9253670>